

Modelovanie oteplenia palivového článku v jadrovom reaktore

Heretík Peter · Elektrotechnika, Študentské práce

09.09.2011



Táto práca sa zaoberá modelovaním teplotného poľa v palivovom článku jadrového reaktora, pričom sa skúma vplyv generovaného tepla na jeho oteplenie pre rôzne zaťažovacie stavy. Modelovanie a simulácia bola vykonávaná metódou konečných prvkov v programe ANSYS na vybranom priestorovom modeli palivového článku.

1. Úvod

Teplota palivového článku v jadrovom reaktore počas bezpečnej prevádzky nesmie prekročiť dovolené hodnoty. Preto sa jeho teplota meria alebo sa jeho oteplenie simuluje analytickými a numerickými metódami. V predkladanej práci sa zaoberáme zostavením modelu palivového článku, ktorý využívame na stanovenie jeho ustáleného oteplenia pri zvolených okrajových podmienkach. Pre porovnanie výsledkov sme zvolili zjednodušený model palivového článku s homogénnym generovaným teplom využitím rotačnej symetrie úlohy. Všetky úlohy sú modelované v programe ANSYS [1].

2. Metóda riešenia teplotného poľa

Oteplenie palivového článku bolo riešené metódou konečných prvkov (MKP). MKP je :

- počítačovo orientovaná metóda riešenia úloh v teórii poľa (silové, deformačné, elektrostatické, elektromagnetické, teplotné, rýchlostné, žiarenie, atď.)
- približná metóda riešenia systému parciálnych diferenciálnych rovníc (dif. rovnice rovnováhy, dif. rovnice vedenia tepla, el. prúdu, elektromagnetickej indukcie, atď.)

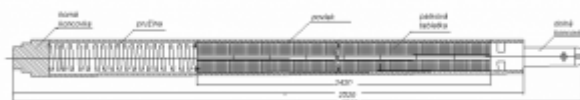
Princíp metódy: počiatočný stav telesa (silový, deformačný, teplotný, ...) sa popíše funkcionálom (funkcia funkcií), ktorý obsahuje príslušné známe i neznáme stavové veličiny (sily, napätia, deformácia, počiatočná teplota, tlak, rýchlosť pohybu, ...) na určitej oblasti (povrch alebo objem telesa). Treba nájsť také hodnoty neznámej veličiny v bodoch telesa (posunutie, teplota, rýchlosť), ktoré robia daný funkcionál stacionárnym. Spravidla ide o hľadanie minima funkcionálu pre dané počiatočné a okrajové podmienky. Hľadaním stacionárnych hodnôt funkcionálov sa zaoberá variačný počet [7].

Vstup pre MKP: počiatočný mechanický, teplotný, elektrický, atď. stav telesa, materiálové vlastnosti, počiatočné a okrajové podmienky.

Výstup z metódy: okamžitý stav telesa (deformácia a napätosť v bodoch telesa, rozdelenie teploty, rýchlosť pohybu, vlastné tvary a vlastné frekvencie systému, elektrický potenciál, prúdová hustota, elektrické straty, atď...).

3. Modelovanie a simulácia oteplenia palivového článku

Priestorový model palivového článku budeme riešiť ako rotačne symetrickú úlohu (rotačne symetrický prierez celého palivového článku s rovnakým generovaným teplom)

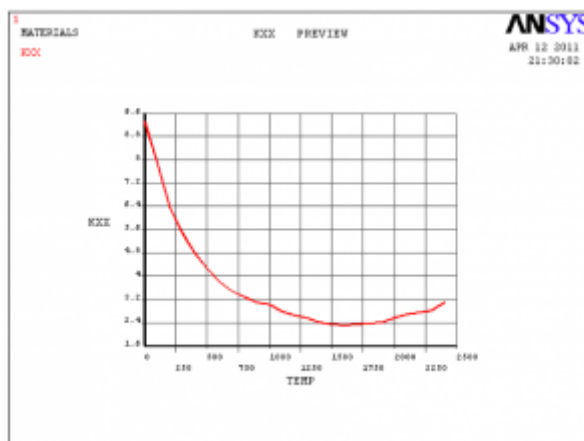


Obr. 1. CAD model palivového článku

Pri namodelovaní palivového článku, ktorého výška je 2,536 m, predpokladáme, že teplotné pole sa mení v pozdĺžnom i radiálnom smere palivového článku. Palivový článok sa skladá z 5 častí, ako môžeme vidieť na Obr. 1. Najdôležitejšia je tá časť, kde sa nachádza urán, v ktorom sa generuje teplo. Základné rozmery palivového článku sú prebrané z [2].

4. Materiály

Jednotlivé časti palivového článku sa vyznačujú tepelnou vodivosťou λ , ktorá je závislá od teploty. Pre urán je daná závislosť tepelnej vodivosti λ od teploty výrazná, ako môžeme vidieť na Obr. 2.[2].



Obr. 2. Závislosť tepelnej vodivosti λ [W/ m²K] uránu od teploty.

Ostatné materiály majú tepelnú vodivosť podľa (Tab. 1).

Tab. 1. Tepelná vodivosť λ materiálov

materiál	tepelná vodivosť λ [W/m ² K]
plyn	0,35
He	0,2
Zirkónium	20,2

5. Okrajové podmienky

Pri riešení teploty palivového článku ako rotačne symetrickej úlohy sme predpokladali, že palivový článok obteká chladiaca voda primárneho okruhu jadrovej elektrárne o teplote 300 °C. V reálnom reaktore VVER 440 je teplota vstupnej chladiacej vody 267 °C a výstupnej chladiacej vody 297 °C. Hodnota koeficienta prestupu tepla konvekciu sme zvolili $\alpha = 35\,000\text{ W/m}^2\text{K}$ [2].

6. Zdroj tepla

Analyzoval sa výkon jednotlivých palivových prútikov v celej aktívnej zóne na základe reprezentatívnej závažky aktívnej zóny. Horúci prútik - je prútik s maximálnym výkonom, ktorý sa reálne v aktívnej zóne nenachádza, ale pri modelovaní ho uvažujeme. Jeho výkon je 1,692 - násobku výkonu priemerného prútika [6]. Priemerný prútik - prútik v aktívnej zóne s priemerným tepelným výkonom [6]: $1\,471,25\text{ MW}$, $349/126 = 33,46\text{ kW}$. Početnosť prútikov v jednotlivých skupinách je uvedená v nasledujúcej (Tab. 2) [6].

Tab. 2 Rozdelenie prútikov v aktívnej zóne

Skupina	Násobky výkonu priem. prútika	Max. výkon prútika [kW]	Počet prútikov	Počet kaziet
1	<min - 0.8>	26,77	9312	74
2	(0.8 - 1.2>	33,46	23286	185
3	(1.2 - 1.4>	40,15	9300	74
4	(1.4 - HP>	56,60	2076	16
Spolu			43974	349

Pre potreby výpočtu sme uvažovali prútiky s výkonom 0.8, 1, 1.2, 1.4 a 1.7 násobku výkonu priemerného prútika, ktoré sú uvedené v (Tab. 3).

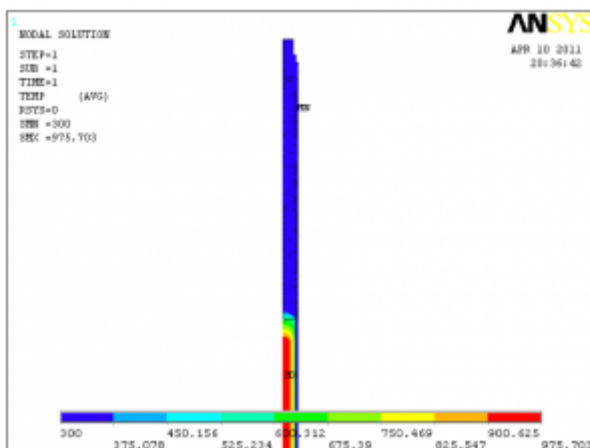
Tab. 3. Rozdelenie prútikov pre výpočet podľa tepelného výkonu

Násobok výkonu priemerného PP	Použitá hodnota vo výpočte	Označenie vo výpočtoch
0,8	26,768 kW	0.8 PPP
1	33,46 kW	Priemerný prútik
1,2	40,152 kW	1.2 PPP
1,4	46,844 kW	1.4 PPP
1,7	56,6 kW	Horúci prútik

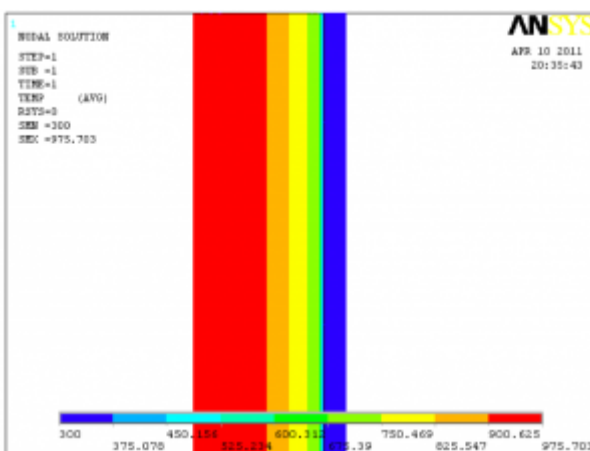
7. Teplotné pole palivového článku

Na Obr. 3, Obr. 4, Obr. 5. je zobrazené teplotné pole v jednotlivých častiach palivového článku. Pre jeho výšku, ktorá dosahuje 2,534 m, sa graficky rozdelil

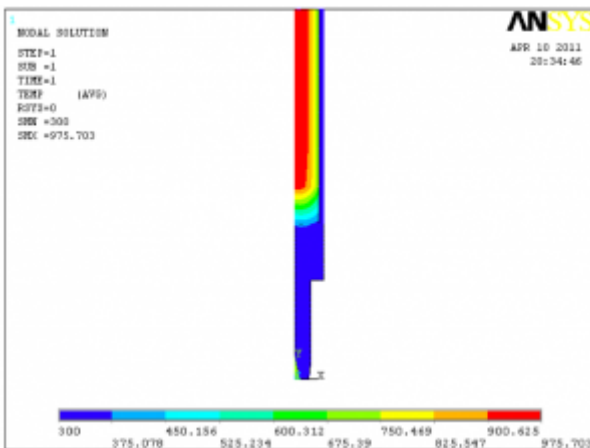
palivový článok na 3 časti: horný koniec, stredná časť a dolný koniec.



Obr. 3. Teplotné pole v palivovom článku – horná časť.



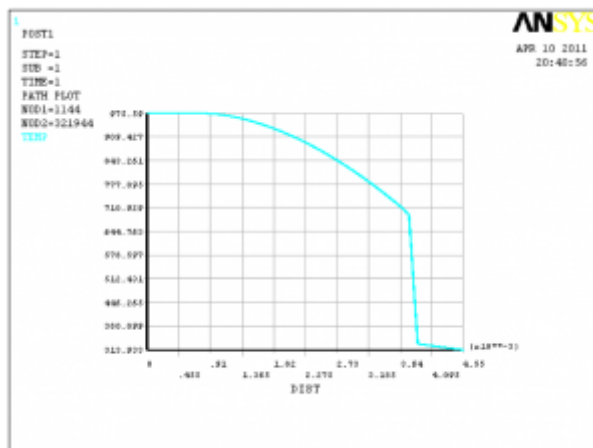
Obr. 4. Teplotné pole v palivovom článku – stredná časť.



Obr. 5. Teplotné pole v palivovom článku – dolná časť

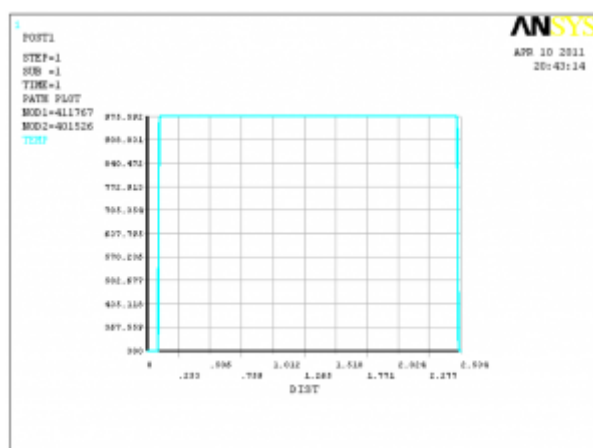
Vidíme že, maximálna teplota je 975,703 °C. Najvyššia teplota sa nachádza v uráne a v malej medzere, kde sa zhromažďujú plyny. Palivový článok postupne v smere osi x k vonkajším stenám chladne, kde odvádza teplo a tým sa zohrieva chladiaca voda.

Priebeh teploty priemerného prútika v strednej časti palivového článku v radiálnom smere je znázornený na Obr. 6. Maximálna teplota je 975,59 °C, zatiaľ čo minimálna teplota je 313,933 °C.



Obr. 6. Závislosť priebehu teploty v radiálnej osi v strednej časti článku.

Na Obr. 7 vidíme priebeh teploty priemerného prútika po výške palivového článku na osi rotačnej symetrie. Pri výške palivového článku 2,534 m pozorujeme výrazný nárast teploty v strede palivového článku, ktorá sa pohybuje na úrovni 975,592 °C.



Obr. 7. Závislosť teploty po výške palivového článku.

Na vonkajšej stene palivového článku vidíme zohrievanie chladiacej vody, ktoré spôsobuje prenos tepla konvekciou. V reálnych reaktoroch pri vysokých teplotách hrozí porušenie integrity palivového článku, preto je dôležité skúmať vplyv konvekcie a generovaného tepla na jeho teplotu. Pre rôzne násobky tepelného výkonu palivového článku môžeme vidieť (Tab.4) maximálne a minimálne oteplenie palivového článku.

Tab. 4. Oteplenie v závislosti na tepelnom výkone článku

násobok tepelného výkonu [-]	maximálna teplota [°C]	minimálna teplota [°C]
0,8	826.587	311.147
1	975.590	313.933
1,2	1128.570	316.720
1,4	1284.825	319.507
1,7	1525.200	323.569

9. Zhodnotenie výsledkov

V nasledujúcej stati sme získané výsledky porovnali s inými relevantnými, ktoré boli

získané výpočtovým programom RELAP 5 v už vypracovanej diplomovej práci [6]. V spomínanej diplomovej práci sa palivový článok modeloval ako jednorozmerná úloha. V predkladanej našej práci sa palivový článok modeloval ako 3D systém. Porovnanie výsledkov maximálnych dosiahnutých oteplení palivových článkov pre rôzne generované teplá môžeme vidieť (Tab. 5).

Tab. 5. Oteplenia palivových článkov pre rôzne generované teplá

násobok generovaného tepla [-]	maximálna teplota Ansys [°C]	maximálna teplota RELAP5 [°C]
0,8	826.587	774.500
1	975.590	901.800
1,2	1128.570	1025.300
1,4	1284.825	1148.100
1,7	1525.200	1485.400

Z danej tabuľky vidíme, že maximálne oteplenia palivových článkov sa vo väčšej miere zhodujú.

8. Záver

V tejto práci je vytvorený 3D MKP model palivového článku na výpočet jeho oteplenia pri rôznych okrajových podmienkach a tepelnom výkone článku. Sledovali sme taktiež vplyv vnútorného zdroja tepla na maximálnu teplotu palivového článku. V diplomovej práci sa zameriame na spresňovanie geometrického modelu i okrajových podmienok s hlavným zameraním na presné stanovenie koeficientu prestupu tepla konvekciou medzi povrchom článku a chladiacou vodou, ako aj presný výpočet rozdelenia vnútorného zdroja tepla v uráne, postavený na teórii jadrových reaktorov.

9. Odkazy na literatúru

1. ANSYS v. 11, MKP program a manuál k počítačovému programu.
2. Heřmanský, B.: Termo – mechanika jaderných reaktorů. Praha 1986.
3. Kalousek, M., Hučko, B.: Prenos Tepla Bratislava 1996
4. Muškát, P. – Urban, F. – Pulmann M.: Merania na fyzikálnom modeli palivového článku jadrového reaktoru. In: Strojnícky časopis, roč. 59, 2008, č. 5-6, s. 305-315
5. <http://www.seas.sk/elektrarne/atomove-elektrarne/atomove-elektrarne-bohunice/technicke-parametre/>
6. Sačková M. (2010) : Analýzy teplotného poľa v palivovom prútku. Diplomová práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava.
7. <http://aladin.elf.stuba.sk/Katedry/KMECH/>

Spoluautorom článku je prof. Ing. Justín Murín, DrSc., Katedra mechaniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave
Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Aplikovaná mechanika, ISBN 978-80-227-3508-7

